

Argamassa Reforçada com Armadura Difusa de Aço

José Eduardo Fairbanks Nascimbeni

Arquiteto e mestre pela FAUUSP em 1989.

Resumo

Apresenta métodos de ensaio, resultados e conclusões de experimentos controlados em corpos de prova e peças de argamassa reforçada com fibras de aço, como armadura difusa. São abordadas considerações teóricas sobre as condições gerais de ruptura e sobre as interferências fibra/matriz. Concluiu-se haver viabilidade técnica no uso do compósito, quanto à resistência à flexão.

Dissertação de mestrado apresentada à FAUUSP em jul. 1989.

Orientação: Prof. Dr. Ualfrido Del Carlo.

Abstract

The aim is to get data for registering the behavior of steel fibres reinforced mortar. Features testing methods, results and conclusions about studies carried on pieces of armed mortar. Some theoretical questions about the faults in cementitious materials and the effect of fibres in brittle matrices were also studied. It is clear that it does exist the technological viability in its use. This text is written in Portuguese.

Introdução

O Brasil apresenta uma carência habitacional crônica e aguda, decorrente da falta de política adequada. Diversos pesquisadores têm estudado soluções para o problema, cada qual segundo suas concepções técnicas, sociais e ideológicas, e apresentam estudos de grande variedade, no que concerne aos métodos de equacionamento da questão. Embora sejam bastante diversificadas as abordagens, todos eles têm a consciência de que a solução para o problema habitacional passa, obrigatoriamente, pela produção de habitações em larga escala.

Dentre os inúmeros aspectos passíveis de estudo que objetive a produção de componentes em grande escala, figura o material de construção que poderá ser empregado. A dissertação de mestrado que originou este texto versa sobre um material, que teve comprovada sua viabilidade tecnológica: a argamassa armada com fibras.

Evolução Histórica da Argamassa Armada

A paternidade oficial pela invenção da argamassa armada pertence a Jean-Louis Lambot (1818-1887), que definia-o como um substituto perfeito para a madeira, constituído por “uma rede ou conjunto de arames ou barras metálicas encaixadas ou cimentadas juntas com cimento hidráulico, de tal maneira a formar vigas ou pranchas de qualquer tamanho desejado”, conforme consta em seu pedido de patente de 1856. O jardineiro Lambot fazia vasos para plantas e notou que a partir de certo tamanho, os vasos não apresentavam resistência mecânica suficiente para desempenhar sua função. Reforçou-os, então, com cintas de arame, criando o material que chamou de “fercement”. O novo material foi também bastante usado na confecção de botes e barcos, alguns até com 400 toneladas de deslocamento.

O desenvolvimento subsequente desse material diferiu ligeiramente de seus conceitos iniciais: àquela época, a tecnologia metalúrgica era insuficiente para prover o mercado de fios delgados em quantidade suficiente e a preços compatíveis com sua incorporação ao cimento. Em decorrência, os usuários desse material passaram a usar barras mais grossas na região tracionada das peças, dando início à tecnologia do concreto armado.

Posteriormente, com a grande disponibilidade de fios e telas de arames delgados, a argamassa armada passou novamente a ser utilizada como material de construção: em 1943 o material foi redescoberto por Pier Luigi Nervi, a quem se deve a retomada do desenvolvimento do material. Nervi produziu diversas edificações que empregavam argamassa armada entre 1946 e 1960.

No Brasil o emprego do material foi iniciado em 1960, na Escola de Engenharia de São Carlos (USP) como cobertura de edifícios, em 1980 passou a ser utilizado por João Filgueiras Lima em elementos pré-moldados, trabalho que culminou na Fábrica de Escolas do Rio de Janeiro.

Alguns Conceitos Teóricos sobre o Material

Os materiais homogêneos têm a característica de apresentar comportamentos similares quando submetidos à compressão e à tração. Assim o aço, por exemplo, apresenta resistências mecânicas de mesma ordem de grandeza quando submetido a tais solicitações.

Já o concreto simples – material heterogêneo – apresenta à tração uma ordem de grandeza menor (cerca de 10%) da resistência que apresenta à compressão. Tal diferença de comportamento decorre das interfaces entre os materiais componentes – no caso: cimento, areia e pedra – onde há brusca mudança na forma dos arranjos cristalinos, regiões onde ocorrem tensões que determinam planos de ruptura preferenciais.

Assim, quando for desejável que o material resista igualmente à compressão e à tração, deve-se buscar materiais tão homogêneos quanto possível.

No sucinto histórico apresentado, nota-se as grandes racionalizações por que passou o material: a primeira, quando um material frágil foi armado com outro, objetivando um ganho na resistência à tração. A segunda, quando a armadura originalmente dispersa pela superfície, foi concentrada como barras grossas, na região tracionada. A terceira grande racionalização ocorreu quando tomou-se viável a incorporação de fios de arame – e mais atualmente de telas – como reforço mais difuso.

Seguindo-se o raciocínio de diminuição dos diâmetros das armaduras em prol do ganho de homogeneidade, está atualmente em curso a quarta grande racionalização do material: o uso de fibras (de pequeno diâmetro) resistentes à tração, para reforçar matrizes inelásticas.

As mais modernas teorias sobre a interferência matriz/fibra, corroboradas por ensaios mecânicos e por microscopia eletrônica indicam que, quanto mais delgada for a armadura incorporada em determinada matriz, tanto maior será a resistência mecânica do material compósito, uma vez que a área superficial de ancoragem será aumentada.

A teoria mais aceita sobre a ruptura dos materiais sólidos fundamenta-se na concentração de tensões que se alinham nas bordas de uma falha, e que atingem valores elevadíssimos, da ordem das forças de coesão teóricas, dando origem à ruptura. Com base nessa mesma teoria, deduz-se que a ruptura por compressão é função da resistência à tração.

Do parágrafo anterior extraem-se duas considerações importantes: primeiro, que a resistência à tração é importante também para o comportamento à compressão; em segundo lugar que, em se tratando de falhas, o volume do componente construtivo é fator preponderante, uma vez que não cabem grandes falhas em peças de dimensões reduzidas.

Um último conceito teórico necessário à compreensão dos aspectos posteriores é sobre a direção das fibras dispostas no compósito, em relação à direção das forças solicitantes. Se uma fibra resistente estiver disposta na mesma direção dos esforços solicitantes, apresentará rendimento de trabalho de 100% de sua capacidade, o que equivale a dizer rendimento 1,0. Se, por outro lado, uma fibra estiver localizada perpendicularmente à direção solicitante, então tal fibra não trabalhará à tração, o que equivale dizer que apresentará rendimento 0 (zero). Entre os dois extremos existem posições intermediárias de localização, direcionamento, e de trabalho realizado.

O Material Pesquisado

É fato comprovável que a pesquisa tecnológica busca, primordialmente, elevado desempenho com custos produtivos minimizados. Assim, a presente pesquisa sintetizou todos os avanços tecnológicos atualmente estudados, tanto no que diz respeito ao aglomerante e aos agregados, quanto no que concerne à armadura.

O estudo do aglomerante e dos agregados foi motivo de trabalho anterior à dissertação de mestrado que este texto sumariza, e de autoria deste mesmo pesquisador. Trata-se de uma matriz composta de cimento CP 32 adicionado de cinza de casca de arroz como material pozolânico, e aditivado com naftalenos sulfonados condensados com formaldeído, como superfluidificante tensoativo.

Os agregados em questão são constituídos por pó de pedra de granito complementados por areia grossa lavada, segundo a curva de granulometria contínua. Os "fillers" são providos por microsslica Elkem que, além de "filler", atuam como aglomerante ativo, dada a sua altíssima superfície específica.

Quanto à armadura difusa, foi escolhida para o trabalho original a fibra vegetal, por motivos de alta disponibilidade, grande energia intrínseca e facilidade de preparo para uso como armadura difusa. Entretanto, problemas de ordem química – hidrólise alcalina acentuada nas cadeias celulósicas – motivaram a substituição das fibras vegetais pelas de aço, temporariamente, até que pesquisa específica resolva aquele aspecto degradador.

No trabalho original foram usadas fibras diferentes para atuação em três ordens de grandeza: o fórmio atuando na ordem dos centímetros, jornal e papel “Kraft” desfibrados atuando na ordem dos milímetros e silicato de sódio, atuando no submilimétrico. Foi então constituída uma rede de fibras resistentes à tração, à semelhança inversa da curva granulométrica dos agregados, que resiste à compressão.

Como a degradação química das fibras vegetais foi relegada à pesquisa de longo prazo, foram elas substituídas por fibras de aço, no estudo que resultou neste trabalho. Uma vez que alguns comportamentos mecânicos independem do material escolhido, como as resistências às primeiras idades, resistência ao impacto, etc., o presente estudo com fibras de aço vale também para aplicação às fibras vegetais, anteriormente à sua degradação química. Assim, por motivo de pragmatismo e de urgência na divulgação de dados primários, o estudo foi conduzido com a aplicação de fibras de aço.

Evidentemente, a substituição de fibras vegetais por fibras de aço acarretam observações a respeito de oxidações, expansões e durabilidade frente às intempéries que são próprias do aço. Tais estudos foram criteriosamente levados a cabo em corpos de prova e em espécimes em escala real, tanto em pátio de envelhecimento acelerado, como em câmara úmida. A condução e execução desses ensaios e testes estão bem descritos na dissertação origem deste artigo. Portanto este texto abordará somente aspectos superficiais de seus resultados, e as conclusões mais significativas.

Os Ensaios Realizados

Para os estudos das questões propostas e para a mensuração das variáveis nelas envolvidas, foram moldados espécimes de diversas formas, e ensaiados segundo diversas condições: foram consideradas variáveis a forma da armadura, as dimensões das amostras, os tipos de ataques a que as peças estiveram submetidas e as solicitações mecânicas ocorridas.

Quanto à forma da armadura, foram moldadas peças armadas com fibras contínuas dispostas segundo a duração longitudinal dos esforços (aqui chamadas de “manta”) e com fibras curtas cortadas em comprimentos de poucos centímetros (aqui chamadas de “palha picada”).

Quanto às dimensões das amostras, foram ensaiados corpos de prova medindo $2 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ e também placas planas de $1 \times 20 \times 100 \text{ cm}^3$. Estas placas foram submetidas a ensaios de corrosão da armadura sob três diferentes condições de proteção superficial: placas nuas, sem nenhum revestimento externo, placas pintadas com tinta branca epoxídica e placas revestidas com tinta branca à base de poliuretano. As placas planas foram submetidas a três tipos de ataque: armazenadas em câmara úmida, algumas nuas, tensionadas e limpas, e outras também nuas, tensionadas mas com cloreto de cálcio em suas superfícies. De algumas das placas foram extraídos corpos de prova que foram submetidos a dois tipos de condições ambientais: alguns foram armazenados em câmara úmida e outros foram submetidos a ciclos de saturação/secagem completa.

Quanto às solicitações mecânicas medidas, foram avaliadas à tração na flexão com carga central e nos terços, à compressão segundo a norma ASTM C-349-80, ao impacto com massa esférica de 0,850 kg, e ainda ao intemperismo em pátio cercado, estando as amostras no eixo norte-sul, horizontais e carregadas com 30% da carga de ruptura, aplicada nos terços.

Todos os testes foram executados segundo, preferencialmente, as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e, secundariamente na sua falta, pelas Normas da American Society for Testing and Materials (ASTM).

A metodologia de preparo e teste das amostras, assim como a caracterização dos materiais empregados – cimento, agregados, água, fibras de aço e tintas protetoras – constam da dissertação de mestrado e não estão aqui apresentadas. Todos os testes foram realizados no Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S/A – IPT.

Apreciação dos Resultados

1. Dos ensaios de corpos de prova armados com mantas, à tração na flexão:

A resistência do material cresceu com a porcentagem de armadura incorporada, independentemente de seu diâmetro. Entretanto, palhas de aço mais grossas são passíveis de serem incorporadas em maior quantidade. Os corpos de prova mais pobres de agregado puderam ser armados com maior porcentagem de palha e, portanto, apresentaram valores mais elevados de resistência última. Foram conseguidas resistências até 5 vezes maiores que a da matriz não armada.

2. Dos ensaios de corpos de prova, armados com fibras curtas:

Nos testes de tração na flexão, os melhores desempenhos ocorreram com a armadura de diâmetro médio, e de comprimento 5 mm e 10 mm para as matrizes mais ricas em cimento.

Nos ensaios à compressão, foram confirmadas as teorias que defendem a idéia de que as fibras pouco influem nessa solicitação. Todas as palhas de aço apresentaram resultados praticamente iguais, independentemente de espessura ou comprimento.

Nos testes de impacto, entretanto, a incorporação das fibras aumentou a altura máxima de queda de cerca de 7 a 10 vezes, o que significa aumentos de energia dissipada cerca de 100 vezes maior que a apresentada pela matriz não armada.

3. Nos ensaios em placas planas:

De modo geral, houve estreita relação entre os resultados obtidos em corpos de prova e em placas, confirmando as teorias de resistência dos materiais. O aumento da porcentagem de areia diminui a resistência final e a ductilidade, ao contrário do que ocorre com o aumento da porcentagem de armadura incorporada. A exposição das amostras aos ciclos seco/saturado diminuiu a resistência do material, embora não com a intensidade prevista para tal agressividade.

Conclusões

É possível afirmar que foi atingido o objetivo de conferir ductilidade a matrizes frágeis através da inclusão de fibras, conseguindo-se substituir a fratura única por microfissuras espaçadas. Tal fato é de grande importância porque a argamassa armada, sendo trabalhada sempre em pequenas espessuras, tira proveito da forma das peças, independentemente da quantidade de material empregado. A ductilidade conferida ao material permite a dissipação de tensões mediante a acomodação dimensional, acarretando maiores tensões suportadas.

O material apresentou viabilidade tecnológica no seu emprego na construção civil. Veio reforçar uma tendência já delineada em outros países, de reforçar matrizes com fibras. Já é de domínio comum aos meios de pesquisa, que as fibras difusas melhorem significativamente as características da matriz a que foram incorporadas. Sendo o Brasil um

dos poucos países que produzem fibras de aço de pequeno diâmetro (e mais, o Brasil produz um dos aços mais baratos do mundo), este novo material adquire um caráter regional particularmente interessante.

O ineditismo do trabalho reside no emprego de fibras curtas de aço, uma vez que tradicionalmente a argamassa armada é reforçada com telas metálicas. O uso de fibras curtas difundidas diretamente na massa permite o uso de sistemas produtivos mais rápidos, como a calandragem, extrusão, estampagem, "vacuum forming", etc., uma vez que o gargalo produtivo no sistema tradicional está justamente na demora envolvida no corte, dobradura e colocação das telas metálicas no interior dos moldes.

No terreno acadêmico, o trabalho oferece dados primários sobre o comportamento mecânico e químico do material, fornecendo material para novas pesquisas.